法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-10-06

屋根散水の冷却効果について : 冷却効果とその要因

PARK, Chanpil / 前川, 鉄也 / 出口, 清孝 / 古川, 修文 / 朴, 賛弼 / MAEKAWA, Tetsuya / DEGUCHI, Kiyotaka / FURUKAWA, Nobuhisa

(出版者 / Publisher)
法政大学工学部
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学工学部研究集報 / 法政大学工学部研究集報
(巻 / Volume)
41
(開始ページ / Start Page)
27
(終了ページ / End Page)
30
(発行年 / Year)
2005-03
(URL)
https://doi.org/10.15002/00003755

屋根散水の冷却効果について
～冷却効果とその要因～

COOLING EFFECTS OF WATER SPRAYING
~ FACTORS OF COOLING EFFECTS ~

前川鉄也*，出口清孝**，古川修文**，朴賛弼**
Tetsuya MAEKAWA, Kiyotaka DEGUCHI, Nobuhisa FURUKAWA and Chanpil PARK

This study deals with water evaporative cooling by means of roof spraying. The passive cooling effect in buildings and the cause of cooling effect were examined experimentally through experimental model measurements. To clarify the cause of cooling effect and examine the best conditions to get maximum cooling effect, tests were carried out under various conditions of water supply rates, roof materials and climatic conditions in this study.

Key Words: *屋根散水，モデル実験，熱負荷軽減*

1. はじめに

本研究は，屋根散水の冷却効果とその要因について明らかにし，どのような条件が屋根散水をした場合に一番効果的なのかを明らかにすることを目的としている。

本研究では，散水量，屋根材料，気象条件が冷却効果に影響を与える大きな要因と考え，それぞれの要因について検討している。

図 1 に示す，一般的な工場の屋根を再現したモデルを2つ作成[1]して実験を行った。一方に散水を行い(散水モデル)，もう一方を散水を行わず(非散水モデル)，同一気象条件下で実験を行うことで冷却効果の定量的な把握を行った。

散水量については，散水量が多くなる程，屋根面の濡れ面積が大きくなる。その為，蒸発量が多くなって蒸発冷却効果がより得られると考え，2，6，10，20，40kg/m²hの5パターン設定して実験を行った。

屋根材料は，鉄板とスレートの2つの材料を用いて実験を行う。一般の工場の屋根に使われている材料の中で物性値の大きく異なる[2]2つの屋根材を比較することで，どのような性質を持った屋根材が屋根散水に効果的なのかを明らかにする。

気象条件については，一年で一番屋根散水が効果的と考えられる2004年7月下旬～9月上旬に実験を行った。雨の日を除いているが，夏の様々な気象条件下で実験を行うことによって，どの因子が冷却効果に作用しているのかを明らかにする。

また熱収支式による理論解析を行うことによって，それぞれの要因がどのように作用しているのかを理論的に裏づけると共に，どのような要因がどのように屋根散水の冷却効果に影響を与えているのかを明らかにする。

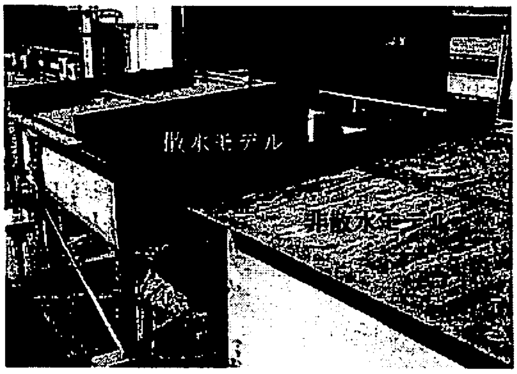

図1　比較モデル写真

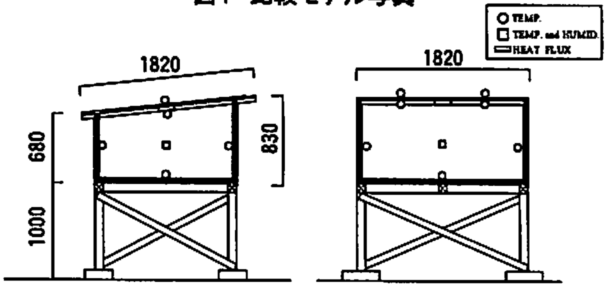

図2　比較モデル断面図

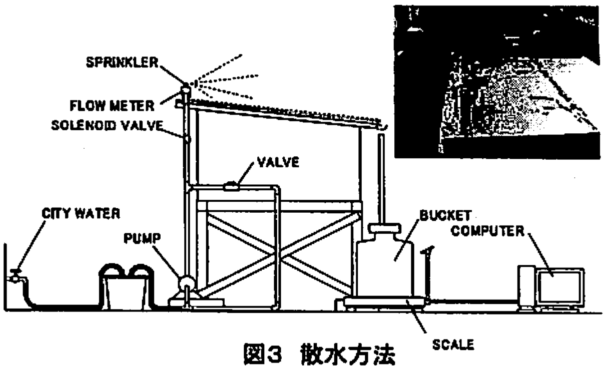

図3　散水方法

＊ 大学院工学研究科建設工学専攻
＊＊ 工学部建築学科

2. 実験概要

（1） 実験モデルの性能

本研究では，図1に示す比較モデルを使用して実験を行った。モデルは屋根からの熱流入を調べる為に，壁面や床面には十分な断熱（グラスウール厚45mm）を施している。

屋根寸法は1820mm×1820mmで，一般の工場の屋根を想定している。形状は片流れで屋根勾配は防水上の技術基準[3)]から1/10とした。屋根の厚さは鉄板1mmに，断熱材として合板15mm，スレート5mmに合板14.3mmである（図2）。両屋根材とも熱貫流率K＝3.76W/(m²・℃)とした。

（2） 散水方法

散水方法は，実験時間中屋根一面になるべく均一に届くようにスプリンクラーを用いて散水を行った（図3）。ポンプによって水量を一定に供給し，バルブと電磁弁によって散水量を制御している。

（3） 実験方法

実験は，日射が遮られることのない法政大学工学部研究棟屋上で，散水モデルと非散水モデル計2つを設置して実験を行った。実験期間は，2004年7月20日～9月10日のうち晴れまたは曇りの20日間実験を行った（表1）。一日の実験時間は10時から16時の6時間である。

測定項目を表2に示す。全天日射量は，実験モデル屋根面から2.5mで，風向・風速はモデルの屋根面から1.5mの高さに設置した。放射温度は屋上より1.5mの高さで測定した。また，外気温湿度はモデル付近に百葉箱を設置し，屋上より1.5mの高さで測定した。

実験モデルの測定点を図2に示す。屋根面温度と天井面温度は屋根面と天井面に2点ずつ対になるように設置した。また，天井面の中心に熱流計を設置した。モデル内温湿度，グローブ温度，壁面温度の測定は床上300mmの点で行った。床面温度は床の中心部に設置した。

散水モデルの散水量，戻り水量測定点を図3に示す。散水温度はスプリンクラーに繋がっているパイプ内に，戻り水温度は戻り水を集める樋にそれぞれ熱電対を設置して測定した。散水量は流量計をスプリンクラーの横に取り付けて測定している。なお，散水量は電磁弁とタイマーによって制御している。戻り水量は，モデル横にポリバケツと電子重量計を置いて重さを測定し，コンピュータに出力して記録を行った。

なお，各測定項目とも記録の時間間隔は5分としている。

（4） 実験条件

散水量，屋根材料，それぞれの要因がどのように冷却効果に作用しているのかを明らかにするため，表3に示すように鉄板屋根で散水量5パターン，スレート屋根で散水量5パターン行い，計10種類の条件の実験を行った。また，気象の要因については，同じ条件の実験を別々の日に2日間行うことで明らかにする。

表1 外界気象条件概要

測定日	天候	最高気温[℃]	屋根材料	散水量[kg/m²h]	測定日	天候	最高気温[℃]	屋根材料	散水量[kg/m²h]
7/20	晴	40.6	鉄板	20	8/12	晴	36.1	スレート	40
7/22	晴	33.7		10	8/20	晴	35.7		20
7/27	晴	37.5		6	8/26	晴	30.9		10
8/2	晴	32.7		40	8/27	晴/曇	28.1		2
8/3	晴	32.6	スレート	40	9/2	晴/曇	32.3	鉄板	2
8/4	晴	34.4		20	9/3	晴	33.8		2
8/6	晴	35.2		10	9/6	晴	29.3		40
8/9	晴	35.6		6	9/7	曇	31.3		6
8/10	晴	37.1		2	9/9	晴	32.8		10
8/11	晴	34.5		6	9/10	曇	32.4		20

表2 測定項目

Items		Devices(manufacturer)	Methods
Weather	Temp.	Thermo Recorder, SK-200TH(SATO KEIRYOKI)	5minutes time step for automatic record
	Humid.		
	Solar radiation	Pyranometer, MS-62 (EKO INSTRUMENTS)	
	Wind velocity	Wind Recorder MX-305A(MAKINO)	
	Wind direction		
Models	Air temp.	Thermo Recorder, SK-200TH(SATO KEIRYOKI)	
	Humid.		
	Temp. of roof and wall	Thermo Recorder, 35251-21(ETO DENKI)	
	Heat flux	Heat Flowmeter MF-180-10(EKO INSTRUMENTS)	
Water spraying	Water temp.	Thermo Recorder, 35251-21(ETO DENKI)	
	Supply water	Flowmeter OF05ZZF(AICHI TOKEI DENKI)	30 minutes time step for
	Return water	Weight-measuring Scale HW-60KGV(A&D)	2minutes time step for automatic record

表3 実験条件

WATER SUPPLY RATE [kg/m²h]	ROOF MATERIAL	DAYS OF EXPERIMENT
2	IRON	9/ 2, 9/ 3
6		7/27, 9/ 7
10		7/22, 9/ 9
20		7/20, 9/10
40		8/ 2, 9/ 6
2	SLATE	8/10, 8/27
6		8/ 9, 8/11
10		8/ 6, 8/26
20		8/ 4, 8/20
40		8/ 3, 8/12

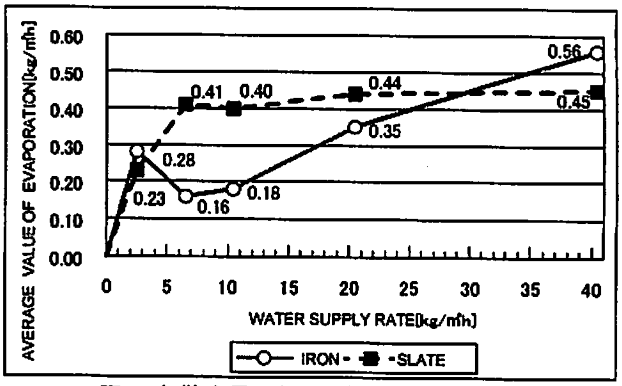

図4 各散水量における蒸発量の平均値

3. 実験結果

（1） 散水量と屋根材料の蒸発冷却効果への影響

図4に各散水量の蒸発量平均値を示す。散水量の違いによる差をみると，平均蒸発量は鉄板屋根，スレート屋根ともに散水量40kg/m²hの時が一番多く，鉄板屋根で0.56kg/m²h，スレート屋根では0.45kg/m²hとなっている。スレート屋根は散水量6～40kg/m²hでは平均蒸発量は0.40～0.45kg/m²hとほぼ変わらない結果が得られた。よって，スレート屋根の場合，

蒸発冷却効果を最大限得る為の散水量は6kg/㎡h程度で十分であると言える。

ここで蒸発冷却効果を最大限得るには，鉄板屋根で散水量を40kg/㎡h，スレート屋根では，6kg/㎡h程度に設定するのが妥当であることが分かった。

次に屋根材の違いによる冷却効果への影響を平均蒸発量で比較すると，散水量6kg/㎡hでは，鉄板屋根の平均蒸発量は0.16kg/㎡h，スレート屋根の場合0.41kg/㎡hとなっており，0.25kg/㎡hの差となっている。また散水量10kg/㎡hでも，平均蒸発量の差は0.22kg/㎡hと大きくなっているが他の散水量では，屋根材の平均蒸発量の差は0.05～0.11kg/㎡hと，あまり差がみられない。

この差は，屋根材のもつ含水率の差と考えられる。鉄板屋根の含水率は0%[2]であるのに対して，スレート屋根は約10%[2]である。散水量6～10kg/㎡h程度では，散水された水をスレートが吸収することで，効果的に蒸発することが出来るためだと考えられる。その為，スレートの方が少ない散水量で蒸発冷却効果が得られ，屋根散水に適していると考えられる。

(2) 気象条件の違いによる冷却効果への影響

どの実験条件ともほぼ同じ傾向の結果が得られた為，ここでは例として鉄板屋根散水量40kg/㎡hの時の各気象条件と熱流入低減量の関係のグラフを図5～図8に示す。熱流入低減量とは，散水モデル，非散水モデルの熱流量の差とし，ここでは，実験で得られた測定値を用いている。

図5に日射量と熱流入低減量を示す。日射量は，最大で約1100W/㎡を示しており，夏の一番日差しの強い時の値とほぼ一致する。相関係数(R値)は0.9173を示しており，日射量と熱流入低減量は非常に高い相関関係にあると言える。

図6に外気温度と熱流入低減量を示す。外気温度は約28～41℃の間となっており，平年の気温よりも高い値を示している。気温が41℃となったのは，フェーン現象の影響と考えられる。相関係数は0.8145となっており，外気温度と熱流入低減量には高い相関関係があることが分かった。

図7に外気湿度と熱流入低減量を示す。ここで示す外気湿度は絶対湿度であり，その範囲は0.01～0.0125kg/kg'である。R値は0.0337となっており，この程度の範囲では熱流入低減量との相関関係はないと考えられる。

図8に外気風速と熱流入低減量を示す。風速は0～1.6m/sとなっており，微風である。相関係数は0.01015となっており，熱流入低減量との相関関係は無いことが確認できた。

実験を行ったのは7月下旬～9月上旬と，一年で一番暑い時期である。その上，実験を行った2004年は記録的な猛暑の日が続き，屋根散水が特に効果的な気候であった。この様な気象条件下では，日射と外気温度が高いほど，熱負荷軽減効果が大きくなるが，外気湿度と外気風速が与える影響は極めて少ないと言える。

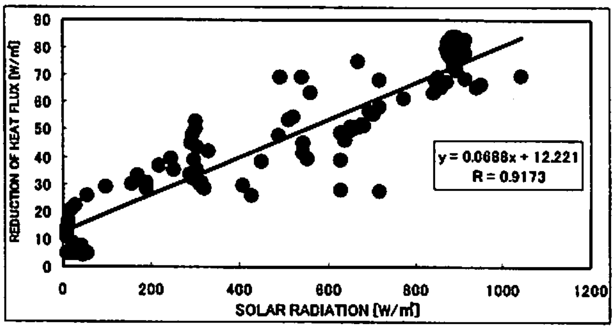

図5　日射量と熱流入低減量

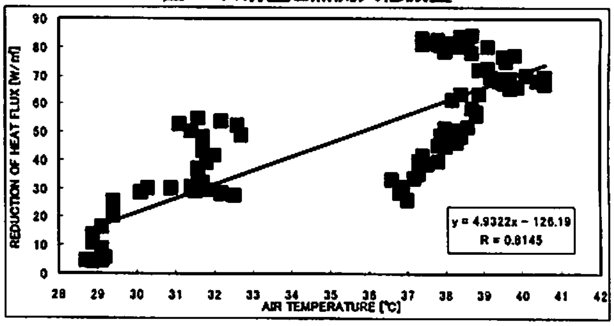

図6　外気温度と熱流入低減量

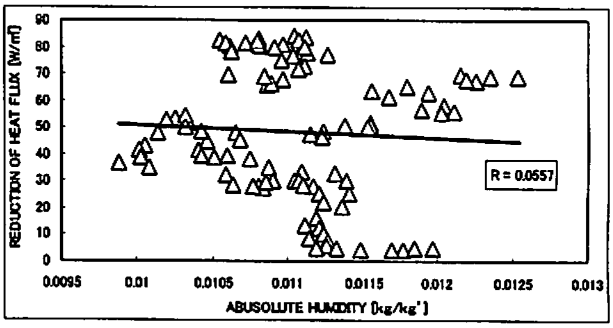

図7　外気湿度と熱流入低減量

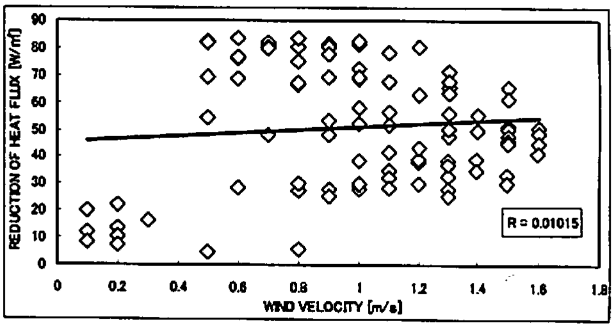

図8　外気風速と熱流入低減量

4. 熱収支式による理論解析

実験結果より，日射量と熱流入量には強い相関関係があることが分かった。そこで，ここでは図9に示す熱収支モデルを用いて式(1)[4]に示す熱収支式に，日射量が800W/㎡の時の実験結果を代入して比較を行う。計算結果を表4に示す。

(1) 散水量の違い

鉄板屋根の蒸発による熱損失(C2)の計算結果を見ると，熱損失量は散水量40kg/㎡hが一番多く，-465W/㎡となって

いる。一方で散水量6kg/m²hが一番少なく，-137W/m²となっている。しかし，屋根面が受ける全熱量(G)を比較すると，散水量40kg/m²hでは-9W/m²に対して，散水量6kg/m²hでは，-1W/m²となっていて，全熱量ではほぼ同じ結果となった。

各散水量の日射吸収率と日射による熱取得(A)を見ると，蒸発による熱損失が大きくなると日射吸収率も大きくなる傾向にあることが分かる。また，他の項目では各散水量で差が見られないため，日射による熱取得(A)が多くなるのと比例して蒸発による熱損失(C2)が大きくなるといえる。この傾向はスレート屋根でも同じである。

実験結果では各散水量で蒸発量に差が見られ，理論計算でも蒸発冷却効果に差がみられた。しかし，蒸発による冷却量が少ないと日射吸収率が変化し，日射による熱取得量も少なくなるため，屋根面が受ける全熱量(G)は各散水量ともほとんど同じであることが分かった。その為，熱負荷軽減効果の観点から考えると散水量は2kg/m²hで十分効果を得られると言える。

(2) 材料の違い

蒸発による熱損失(C2)を比較すると，散水量40kg/m²hでは鉄板屋根の方がスレート屋根よりも，約170W/m²熱損失量が多いが，散水量6～10kg/m²hでは，スレートの方が約80～110W/m²熱損失量が多い。その為，散水量6～10kg/m²h程度では，スレートの日射吸収率が鉄板よりも23～32％程高い数値を示している。蒸発による熱損失が大きくなると日射吸収率も大きくなる為，スレートの方が日射吸収率は高くなっていると考えられる。平均蒸発量の比較でもスレートの方が蒸発量は多くなっており，理論計算でそれが裏付けられた。

屋根面が受ける全熱量(G)は，どの散水量でもスレートが6～20W/m²程鉄板を上回っている。夜間放射による熱損失(B)をみると，鉄板屋根が約45W/m²であるのに対し，スレート屋根では約150W/m²となっている。これは屋根材の放射率の違い[5)]によるもので，この差が全熱量(G)に強く影響している為だと考えられる。

このことにより，屋根散水において熱負荷を軽減させるには，スレートのような含水性があり，屋根放射率の高い屋根材が有効であるということが分かった。

5. 結論

散水量は鉄板屋根では40kg/m²h程度，スレート屋根では6kg/m²h程度で最大限蒸発冷却効果を得ることが出来る。しかし，蒸発冷却効果が高いとその分日射吸収率が高くなり，熱負荷低減効果を比較すると，散水量が2～40kg/m²hの範囲ではあまり差が見られない。その為，熱負荷軽減効果の観点から考えると，散水量は2kg/m²h程度で十分である。

屋根材料では，鉄板のような金属性の屋根材よりも，スレートのような含水性があり，屋根放射率の高い屋根材の方が蒸発冷却効果や熱負荷低減効果を得ることが期待できる。その為，屋根散水ではスレートのような屋根材が有効である。

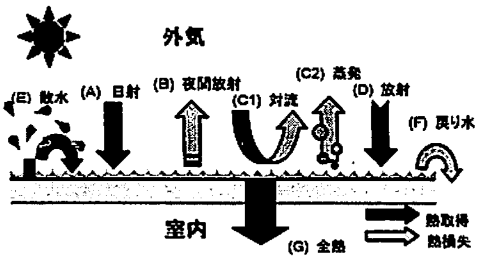

図9　熱収支モデル図

$$\underset{(A)}{a_1 I_1} - \underset{(B)}{\varepsilon_1 \phi_1 I_{LH}} + \underset{(C)}{k_1(i_o - i_1) + \alpha_{ro}(t_o - t_{1w})} + \underset{(D)}{C_{pw} L_S t_w} - \underset{(E)\ (F)}{C_{pw} L_E t_{1w}} = \underset{(G)}{\alpha_o(t_{ow} - t_{1w})} \quad (1)$$

表4　熱収支式計算結果（日射量800W/m²の時）

	散水量 [kg/m²h]	日射吸収率 [-]	(A)日射 [W/m²]	(B)夜間放射 [W/m²]	(C1)対流 [W/m²]
鉄板	40	0.65	521	-45	-2
	20	0.42	439	-46	-9
	10	0.30	342	-45	-6
	6	0.28	350	-45	-40
	2	0.38	409	-43	-40
スレート	40	0.56	649	-145	-3
	20	0.55	441	-156	-13
	10	0.53	379	-153	-10
	6	0.60	409	-151	-34
	2	0.54	434	-154	-21

	散水量 [kg/m²h]	(C2)蒸発 [W/m²]	(D)放射 [W/m²]	(E)散水 [W/m²]	(F)戻り水 [W/m²]	(G)全熱 [W/m²]
鉄板	40	-465	0	0	0	-6
	20	-278	-2	0	0	-4
	10	-171	-1	0	0	-9
	6	-137	-7	0	0	-1
	2	-215	-9	0	0	-2
スレート	40	-292	2	0	0	-16
	20	-271	6	0	0	-17
	10	-250	-6	0	0	-15
	6	-256	-19	0	0	-21
	2	-235	-12	0	0	-12

気象条件は，東京における7月下旬から9月上旬までの気候下では，風速と湿度の熱負荷軽減効果への影響はほとんど見られず，特に日射による影響が強いことが分かった。その為日射の強い日に屋根散水が特に効果的であることが分かった。

付記：本研究は平成16年度私立大学学術研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」および，平成16年度文部科学省科学研究補助金B2(16404016)の一環として行われた。

参考文献

1)前川鉄也・出口清孝，比較モデルを用いた屋根散水による冷却効果の実験に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp. 663－664, 2003
2)依田彰彦他，建築材料教科書 第三版，彰国社，2001
3)WALTER HENN，工場設計資料集成，彰国社，pp. 172-187, 1996
4)石川幸雄，建築環境学2，丸善，pp. 181-202, 1993
5)田中俊六他，最新 建築環境工学 [改定2版]，井上書院，2001